

Предложена математическая модель процесса разогрева энергией микроволнового электромагнитного поля смерзшихся при транспортировке горнорудных материалов с учетом фазовых превращений. Решение сформулированной задачи позволяет определить распределение температур и влагосодержания в твердой и жидкой фазах разогретой пористой среды, закон движения границы фазового превращения и рабочую частоту электромагнитного поля.

Ключевые слова: математическая модель, фазовые превращения, микроволновое нагревание

The mathematical model of adfrozen loose materials warming process by the energy of microwave electromagnetic field is constructed. The solution of the formulated problem allows determining the ranges of temperatures and moisture content in solid and fluid phases of a warmed-up porous medium, the law of the motion of the phase changes limit and working frequency of an electromagnetic field.

Keywords: mathematical model, phase transformations, microwave heating

Рекомендовано до публікації д.т.н. Є.В. Кочурою 07.04.10

УДК 622.236.4.001.1

© Курінний В.П., 2010

В.П. Курінний

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОТІКАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗАРЯДНІЙ ПОРОЖНИНІ ТА В ПОРОДНОМУ МАСИВІ ПРИ ВИБУСІ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН

V.P. Kurinnyi

INVESTIGATION OF THE OBJECTIVE LAWS OF PHYSICAL PROCESSES THAT TAKE PLACE IN CHARGE CAVITY AND SURROUNDING ROCK MASS DURING DETONATION OF EXPLOSIVES

Стаття присвячена встановленню закономірностей та механізму руйнування вибухом гірських порід з неоднорідною структурою на основі можливого керування термо- і газодинамічними процесами в зарядній порожнині та в породному масиві, що оточує заряд. Вивчення процесів, що відбуваються в зарядній порожнині ВР та навколо неї, дозволило встановити закономірності їх протікання та їх взаємозв'язок.

Ключові слова: термо-, газодинамічні процеси, порожнина вибуху, гірські породи, породний масив, детонація, ударна хвиля, хвилі напружень

У теперішній час проблема енергозбереження є важливою в усіх галузях промисловості України і, тим більш, у гірничій справі. На механічне дроблення і подрібнення сировини витрачаються десятки відсотків енергії, що виробляється в країні. Кероване руйнування породи при вибусі – найдоступніший шлях зниження затрат енергії на механічне дроблення і зменшення зносу дробильних машин. Тому робота, присвячена встановленню закономірностей руйнування керованим вибухом гірських порід з неоднорідною структурою, є актуальною.

При вивченні розповсюдження ударних хвиль у ґрунті отримано співвідношення, які дозволяють в першому наближенні оцінити практично всі параметри, що характеризують процес розповсюдження ударної хвилі в ґрунті, а саме:

– швидкість ударної хвилі D [1]

$$D \approx \frac{u_n}{\zeta} \left| \frac{r_n}{r} \right| \frac{u}{\zeta} \sqrt{\frac{p_n}{\psi_0}} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \sqrt{\frac{2\phi}{\zeta} \left| \frac{p_n}{\psi_0} \right| \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2n-1}}, \quad (1)$$

де r_n , u_n – відповідно радіус порожнини вибуху і швидкість породи біля її стінок у момент часу t ; ζ – коефіцієнт шпаруватості породи; r – відстань до осі

свердловини; u – масова швидкість породи на відстані r від осі свердловини; p_n – початковий тиск продуктів вибуху в свердловині; ψ_0 – густина породи; r_0 – радіус свердловини; n – показник адиабати продуктів вибуху; t – час;

– масову швидкість породи u за фронтом ударної хвилі

$$u \approx \sqrt{\frac{\zeta p}{\psi_0}}, \quad (2)$$

кінетичну енергію одиниці маси породи за фронтом ударної хвилі κ

$$\kappa \approx \frac{p \zeta}{2 \psi_0}. \quad (3)$$

Залежність відносного радіусу фронту ударної хвилі від часу наведено на рис. 1.

На підставі досліджень фізичних процесів, що протікають у гірських породах, які містять повітря в шпаровому просторі, при розповсюдженні ударних хвиль (УХ) встановлено, що в процесі генерації УХ половина роботи продуктів детонації (ПД) іде на утворення УХ, а решта – на нагрівання і роздавлювання порід. Тобто, параметри ударної хвилі не залежать від поглинаючих властивостей породи.

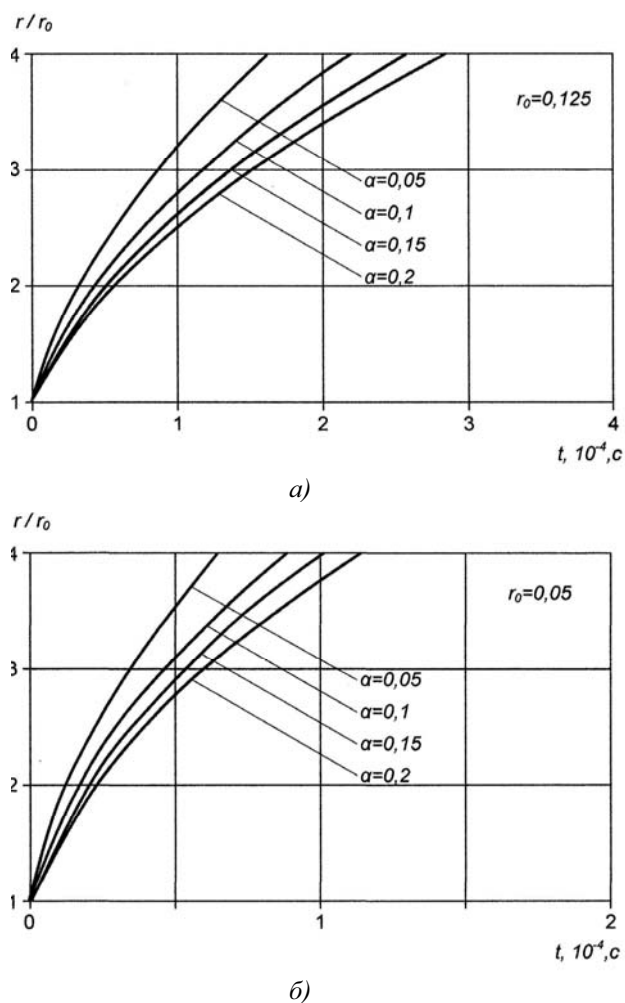


Рис. 1. Залежність відносного радіусу фронту ударної хвилі від часу для свердловин радіусів r_0 : а – $r_0=0,125$, б – $r_0=0,05$

Проведена оцінка тиску p_{np} , необхідного для збудження УХ у шпаристій породі

$$p_{np} \propto \psi_0 \left[\frac{C_p^2}{\zeta} \right], \quad (4)$$

де C_p – швидкість хвилі напружень у породі.

Визначено залежність швидкості стінок порожнини (швидкість породи біля стінки порожнини) u_n від часу

$$u_n/t_0 \propto \frac{1}{n-1} \left[\frac{2\phi \rho_n}{\zeta \psi_0} \right]^{1/2} \left[\frac{2\phi \rho_n}{\zeta \psi_0} \right]^{1/2} \left[\frac{t}{r_0} \right]^{1/n-1}. \quad (5)$$

Одержано залежність радіусу порожнини вибуху r_n циліндричного заряду в породі, що містить повітря в шпаровому просторі, від часу

$$r_n \propto r_0 \left[\frac{t}{r_0} \right]^{1/n-1} \left[\frac{p_n \zeta}{\psi_0} \right]^{1/n-1}. \quad (6)$$

Встановлено, що при розповсюдженні УХ в породі, хвиля зазнає протитиск, який приблизно дорівнює динамічній межі міцності породи при нерівнокомпонентному тривісному стисненні.

Розглянуто процес формування УХ в породі, ударну адиабату якої задано у формі Тета [2]. Цей процес

розглядається як послідовність елементарних хвиль напружень, таких, що кожна наступна хвиля рухається із швидкістю, більшою, ніж попередня.

Умовою формування УХ було утворення ступеневого профілю хвилі. У результаті одержана формула, яка дозволяє визначити тиск p_s , необхідний для збудження ударної хвилі [3]

$$p_s \propto k t_s \left[\frac{k n \div t}{4} \right]^{1/2} \left[\frac{k(n-1) \div t}{A} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

де k – швидкість зростання тиску на породу; t_s – час формування УХ; n – номер елементарної хвилі напружень; $\div t$ – проміжок часу між збудженням двох послідовних хвиль напружень; m, A – коефіцієнти в рівнянні ударної стисливості.

При проведенні чисельних розрахунків виявилось, що $k(n-1) \div t/A$ на декілька порядків менше одиниці, тобто двочлен у знаменнику можна розкласти в ряд, узявши два перших члена. $n \gg 1$, тому тиск, необхідний для утворення ударної хвилі в речовині, можна записати у вигляді

$$p_s \propto \frac{2mA}{m-1} \left[\frac{2\psi_0 C_p^2}{m-1} \right]. \quad (8)$$

За формулою (7) чисельно визначався тиск p_s для різних порід при швидкостях навантаження $k = 10^{14} \div 10^{17}$ Па/с і $\div t = 10^{-9} \div 10^{-17}$ с.

При значеннях тиску $p > p_s$ генерується плоска пряма стаціонарна ударна хвиля. Коли тиск, що викликає хвилю, зменшується, тиск у фронті УХ стає меншим p_s . Дійсно, заряди, що вибухають в лабораторії, мають невеликі розміри. Тиск продуктів вибуху зростає протягом часу $\vartheta \sim 0,1$ мкс, а потім починає зменшуватися за рахунок хвиль розрідження і розвантаження. Ударна хвиля швидко згасає. При зниженні тиску в порожнині вибуху ударна хвиля якийсь час продовжує розповсюджуватися за рахунок кінетичної енергії речовини за її фронтом. Коли тиск у фронті УХ досягає динамічної межі міцності речовини, вона вироджується в хвилю напружень. Оскільки параметри ударної хвилі визначаються не в точці, а на проміжку, то середній тиск, одержаний експериментально, завжди менше p_s .

Відомі експериментальні дані, що ударна хвиля в граніті утворюється при тиску $p > 33$ ГПа, а теоретичне значення $p_s = 37,6$ ГПа. Похибка в цьому випадку складає 12%.

Проведено аналіз процесів, що протікають при модельних і промислових вибухах свердловинних зарядів, який дозволяє зробити висновок, що через відсутність їх фізичної подібності на моделях можна отримати тільки якісні результати, а кількісний перерахунок експериментальних результатів, одержаних на моделях, на результати, які можуть мати місце в промислових умовах, не завжди правомірний (см. табл.).

Досліджено газодинамічні процеси, що протікають при вибусі свердловинного заряду з повітряною порожниною (проміжком). Розглянуті ударна хвиля в проміжку, стаціонарна і центрована хвилі розрідження, відбита УХ і взаємодія центрованої хвилі розрі-

дження з відбитою ударною хвилею. Визначено імпульс вибуху, що діє на бічну поверхню повітряної порожнини. На підставі вивчених процесів, що протікають у порожнині вибуху свердловинних зарядів з повітряною порожниною, встановлено, що за час, протягом якого, в основному, відбувається знеміцнення породи в полі даного заряду, повітряний проміжок випромінює на один-два порядки менше енергії, ніж таких же розмірів частина свердловини з ВР. Тиск продуктів детонації в повітряному проміжку в цьому випадку на один-два порядки менше, ніж у ВР.

Виконані дослідження дозволяють зробити висновок, що в породі поблизу повітряного проміжку діють значні зсувні і розтягуючі напруження, що призво-

дить до ефективного дроблення і знеміцнення породи біля проміжку. Розташування повітряного проміжку біля лінії підосви уступу дозволяє значно поліпшити її опрацювання. Повітряний проміжок у перебуді істотно знижує сейсмонебезпечність вибуху і зберігає в природному стані нижчерозташовані породи.

Дослідження газодинамічних процесів у свердловинному заряді з проміжком із пористого низькощільного матеріалу між зарядом і забійкою (рис. 2) дозволило встановити, що, завдяки наявності проміжку, створюються умови, при яких УХ в породі переганяє УХ у забійці. При цьому нижня частина забійки обтискується хвилею розвантаження від УХ у породі, а це призводить до часткового замикання порожнини вибуху.

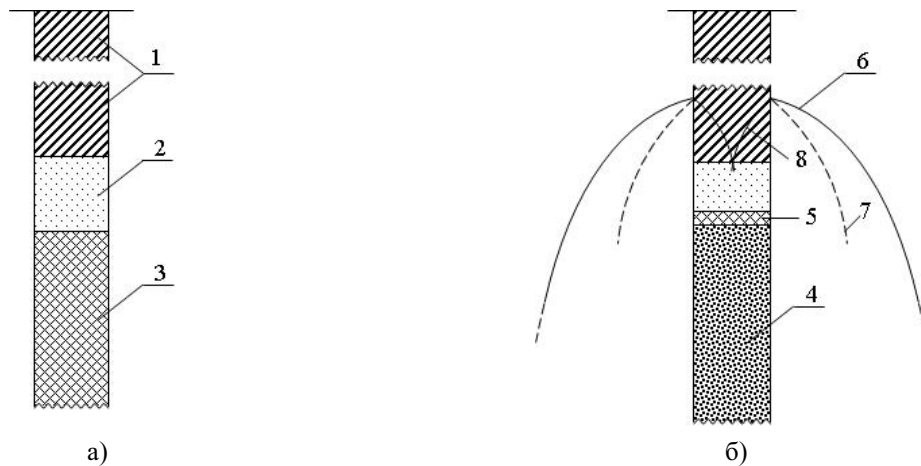


Рис. 2. Свердловинний заряд з низькощільним проміжком біля забійки:

а – свердловинний заряд з проміжком; б – картина хвильових фронтів при вибусі заряду з проміжком у забійці; 1 – забійка; 2 – проміжок; 3 – ВР; 4 – продукти вибуху; 5 – ударна хвиля в проміжку; 6 – фронт хвилі напружень; 7 – фронт хвилі розвантаження; 8 – фронт хвилі стиснення в забійці.

Таблиця

Порівняльний аналіз процесів, що протікають при вибусі свердловинного та його моделюючого зарядів

Свердловинний заряд	Заряд моделі
1. Ударна хвиля виникає не завжди і слабка	1. Завжди виникає ударна хвиля
2. Швидкість детонації ВР, як правило, менше швидкості хвилі напружень. Вектор напружень у породі виконує біля свердловини поворот на кут ϕ	2. Швидкість детонації завжди більше швидкості хвилі напружень. На початковій стадії вибуху хвильові процеси більш інтенсивні, ніж у свердловині, а потім менш інтенсивні
3. Поле напружень має осьову симетрію	3. Поле напружень, в основному, має сферичну симетрію
4. Відношення маси ВР до маси забійки – 3:1	4. Відношення маси ВР до маси забійки – 1:6
5. Відношення розмірів зони дроблення до швидкості хвиль напружень $\approx 10^{-3}$ с	5. Відношення розмірів моделі до швидкості хвиль напружень $\approx 10^{-5}$ с. Велика роль відбитих від вільних поверхонь хвиль напружень
6. Ударна хвиля в забійці згасає	6. Забійка, в основному, вилітає під дією ударної хвилі
7. Максимальний модуль градієнта напружень у породі $\approx 10^9$ Па/м	7. Максимальний модуль градієнта напружень у матеріалі моделі $\approx 10^{13}$ Па/м
8. Порода тріщинувата, часто містить повітря або воду	8. Ефект вибуху залежить від товщини оболонки, матеріалу і повітряного проміжку між оболонкою і шпуром

При вибусі бризантних ВР тиск у фронті детонаційної хвилі за приблизно 2 мкс зростає до тиску приблизно на порядок більше межі міцності породи. Зсув породи за відсутності УХ починається лише через 1-2 мс з моменту проходження детонаційної хвилі (він дорівнює подвоєному часу проходження хвилі напруження від заряду до вільної поверхні). Весь цей час порода роздавлюється і переподрібноється. Для суттєвого зменшення зони роздавлення, тиск у порожнині вибуху повинен зростати не за 2 мкс, а приблизно за одну мілісекунду (рис. 3). Цього можна добитися, вводячи у ВР добавки. На основі вивчення термодинамічних процесів, що протікають при детонації вибухової речовини з інертними добавками, показано, як за допомогою добавок можна знизити максимальний тиск у порожнині вибуху до необхідного і на 2-3 порядки збільшити час хімічних реакцій, тим самим керувати енергією ВР у процесі вибуху.

При дослідженні газодинамічних процесів, що протікають у зарядній порожнині при детонації комбінованих зарядів ВР, які складаються з переміжно розташованих ВР і розрізняються за потужністю, встановлено, що перші мілісекунди, починаючи з моменту ініціації свердловинного заряду, хвильові процеси в зарядах характеризуються значною складністю та інтенсивністю і є джерелом сильно неоднорідного нестационарного поля напружень у породі. У цьому випадку заряд за всією довжиною вибухає каскадно, забезпечуючи певну послідовність імпульсів протягом проміжку часу, значно більшого, ніж при вибусі однорідних ВР.

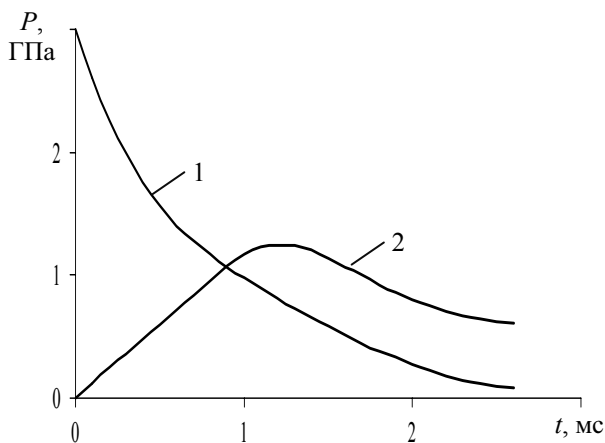


Рис. 3. Залежність тиску продуктів вибуху від часу в перетині свердловини: 1 – штатна ВР; 2 – ВР, що пропонується

Вивчено термодинамічні і газодинамічні процеси, що протікають при вибусі накладного заряду з гелекса 650. Встановлено, що якщо у ВР замінити частинки алюмінію розміром 100 мкм на частинки розміром 10-20 мкм, тиск у порожнині вибуху підвищується на 35-45%, а оскільки густина гелекса на 35-45% більше густини, наприклад, амоніту, то гелекс 650 буде приблизно в два рази більш ефективний при руйнуванні негабариту, ніж амоніт.

При дослідженні механізму детонації емульсійних вибухових речовин з домішками мікросфер встановлено, що порожнисті кулі є достатньо хорошими сенсоризаторами емульсійних вибухових речовин. При кількості введених домішок, що не перевищує 5%, втрати енергії продуктів детонації на домішках незначні.

При дослідженні процесів, що відбуваються в порожнині вибуху вибухової речовини, отримано рівняння стану та адіабати для продуктів вибуху з домішками

$$p/V \approx 4 V_0 \theta / \tau \bar{R} T, \quad (9)$$

де p – тиск; V_0 – об’єм домішок і ефективний об’єм молекул ПВ; τ – число молів; \bar{R} – нова „стала“; T – температура.

„Стала“ \bar{R} дорівнює

$$\bar{R} \approx \frac{mR}{m_0} \left(\frac{C_0 m_0 \bar{M}}{i m R} \right), \quad (10)$$

де m , \bar{M} – маса і середня молярна маса ПВ; m_0 , C_0 – маса і питома теплоємність речовини домішка; R – газова стала; i – середнє число ступенів вільності ПВ.

Показник адіабати для ПВ з речовиною домішка, що нагрівається, має вигляд

$$r \approx k_0 \ln \frac{p_p}{p_n} / \ln \frac{V}{V_n}, \quad (11)$$

де $k_0 \approx \nu \ln \frac{V_0}{V_n} / \ln \frac{V}{V_0}$ – показник адіабати ПВ з до-

мішком, теплоємність якої дорівнює нулю; p_n , V_n – початковий тиск і об’єм ПВ; p_p – тиск в ПВ після нагрівання і фазових переходів речовини домішка.

Застосовуючи ці рівняння спільно з одержаною формулою для розрахунку температури $T \approx T_n (p/p_n)^{(k-1)/k}$ (де T_n – температура ПВ на хіміці; k – показник адіабати), при відомих термодинамічних параметрах речовини домішка і залежності, що характеризує зміну тиску в порожнині вибуху

$$p_p \approx R \frac{m_0}{M_0} \left(\frac{C_{зд} m_0 d T_0 + C_{зд} m_0 T_{кр}}{C_{зд} m_0 + C_m} \right)^{1/k}$$

де T_0 , $T_{кр}$, $T_{пл}$ – відповідно початкова температура, критична і температура плавлення домішка; $C_{зд}$, $C_{зд}$ – питома теплоємність домішка в рідкому і газоподібному стані; V_0 – об’єм речовини домішка, можна визначити масову частку і фракційний склад домішка.

Розглянуто хвильові процеси при вибусі накладного заряду із забійкою і встановлено, що забійка накладного заряду, яка має відносно велику інертність, суттєво підвищує час дії заряду на негабарит, що призводить до збільшення його активної частини. Проведені оцінюючі розрахунки показують, що кумулятивні заряди з порошкового амоніту із забійкою не тільки можуть замінити заряди з тротилу, але виявляються ще більш ефективними.

Встановлено, що збільшити ширину зони хімічних реакцій, зменшити максимальний тиск у порожнині вибуху і частково стабілізувати тиск ПВ на рівні максимального можна, використовуючи два типи вибухових речовин або вводячи добавки у ВР, які повинні відбирати енергію у ПВ до поверхні Чепмена-Жуге і віддавати або виділяти енергію за нею. Окрім цього, частину теплової енергії ПВ вони перетворюють у пружну. Слід зазначити, що інертні домішки повинні мати великі теплоємність і теплофу фазових переходів, а критичний тиск речовини домішок для міцних і дуже міцних порід повинен вимірюватися сотнями МПа. Інакше енергія зворотного фазового переходу не використовуватиметься при дробленні породи. Слід враховувати, що вода не задовольняє жодній з цих вимог, а випадок з алюмоатомом вимагає окремого розгляду. Як домішки використовують речовини, які за поверхнею Чепмена-Жуге вступають в екзотермічні реакції. Вельми перспективними є горючі речовини, що не детонують у порожнині вибуху.

Показано, що при використанні двох типів ВР можна, наприклад, готувати патрони з емульсійних вибухових речовин, центральна частина яких заповнена добре детонуючою ВР, а периферійний циліндричний шар – флегматизованою ВР. Флегматизована ВР повинна детонувати в режимі недостиснутої ДХ, у цьому випадку хвильові процеси в перетині, перпендикулярному осі свердловини, збуджуватимуть подальші ДХ.

Встановлено залежність процесу руйнування гірського масиву вибухом від параметрів свердловинного заряду. Механізм руйнування породи в ударній хвилі схематично наведено на рис. 4.

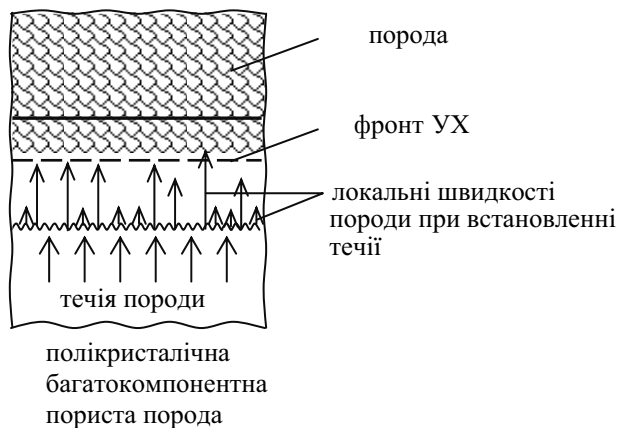


Рис. 4. Механізм руйнування породи в ударній хвилі

У зерні великої густини і малої стисливості швидкість хвилі велика, а швидкість породи мала і навпаки. У фронті УХ швидкості хвиль і породи усереднюються. Визначено швидкість зростання тиску і градієнт напружень у породі при формуванні УХ, які дорівнюють

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= p_y \vartheta \approx 10^{16} \text{ Па/с}; \\ \frac{d\omega}{dr} &= p_y / (D_y \vartheta) \approx 10^{12} \text{ Па/м}, \end{aligned} \quad (12)$$

де p_y – тиск у фронті УХ; ϑ – час хімічних реакцій; D_y – швидкість УХ.

Оцінка мінімального розміру частинок зруйнованої в УХ однорідної за міцністю породи дає наступні результати

$$\omega_{is} \approx \left| \frac{\epsilon \omega}{\epsilon r} \right| \left(\frac{r}{\vartheta} \right) \approx \left| \frac{\omega_{is}}{\epsilon \omega} \right| \frac{D_y}{p_y} h. \quad (13)$$

Оскільки $D_y \approx D$, $p_y \approx 10\omega_{is}$ для більшості бризантних ВР, то $\frac{r}{\vartheta} \approx 0,1h$, де ω_{is} – межа плинності при нерівномірному тривісному стисненні; $\frac{r}{\vartheta}$ – мінімальний розмір часток; h – ширина зони хімічних реакцій.

Вводячи у ВР домішки, критичні параметри і маса яких обираються, виходячи з міцності і тріщинуватості породи, можна зменшити зону подрібнення і збільшити тим самим подрібнюючу і знеміцнюючу дії вибуху. У цьому випадку коефіцієнт корисної дії вибуху суттєво зростає.

Встановлено, що обов'язковою умовою зростання всіх тріщин у породі, що перевищують деяку задану величину, є вимога, щоб амплітуда поля напружень, швидкість зміни навантаження і тривалість його дії перевищували б деякі порогові значення. Для знеміцнення породи необхідно, щоб не тільки виконувалися ці умови, але і густина потоку енергії, що переноситься хвилею, також була обмежена знизу значеннями, різними для різних гірських порід.

Слід також відзначити, що в хвилі стиснення, що розповсюджується в необводненому масиві, зростають переважно тріщини, які перпендикулярні фронту хвилі; в обводненому масиві зростають ще й тріщини, паралельні фронту. У хвилях розвантаження зростають переважно тріщини, паралельні фронту, а в подовжніх пружних хвилях – тріщини, які перпендикулярні і паралельні фронту хвилі.

Список літератури

1. Курінний В.П. Фізичні аспекти руйнування гірських порід вибухом / Курінний В.П. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – 158 с. – Бібліогр.: с.149–155. – (159 назв). – ISBN 978-966-350-152-9.
2. Баум Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др. – М.: Наука, 1075. – 704 с. – Библиогр.: с. 694–704.
3. Куринной В.П. Оценка давления для возбуждения ударной волны в металлах / В.П. Куринной // Материалы Международного семинара „Высокоэнергетическая обработка материалов“. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2009. – С. 86–90. – Библиогр.: с. 90.

Статья посвящена установлению закономерностей и механизма разрушения взрывом горных пород с неоднородной структурой на основе возможного управления термо- и газодинамическими процессами в зарядной полости и окружающем заряд породном массиве. Изучение процессов, происходящих в зарядной полости взрывчатых веществ и окружающей ее среде, позволило установить закономерности их протекания и их взаимосвязь.

Ключевые слова: термо-, газодинамические процессы, полость взрыва, горные породы, породный массив, детонация, ударная волна, волны напряжений